差分像运动视宁度优化监测法*

王子跃[1,3]，任德清[1,2]

1（中国科学院国家天文台南京天文光学技术研究所，江苏 南京 210042）

2（美国加州州立大学北岭分校，物理与天文学系，美国加州 北岭 91330-8268）

3（中国科学院大学，北京 100049）

摘 要：大气视宁度是衡量台址大气光学品质的重要指标。差分像运动视宁度监测仪（Differential Image Motion Monitor ,DIMM），被广泛应用于国内外天文选址的视宁度测量作业，例如,ESO DIMM 被应用于欧洲南方天文台选址。介绍了一种优良的视宁度测量方法——差分像运动视宁度优化监测(I-DIMM, Improved to Differential Image Motion Monitor)法。首先对 I-DIMM 的结构设计和视宁度计算方法进行了详细描述，随后通过设置 0.36m 和 0.12m 两种口径望远镜进行视宁度的模拟测量，将 I-DIMM 测量结果与传统的 DIMM 测量的结果进行对比,均证明 I-DIMM 视宁度计算方法比 DIMM 更为精确,最后对模拟结果进行了分析，证明了 I-DIMM 相比于 DIMM 的优势。

关键词：差分像运动视宁度优化监测法；大气视宁度；台址；差分像运动视宁度监测仪

中图分类号：P11　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1672-7673(2018)

弗洛伊德参数 r_0，即大气光学相干长度，是衡量一个台址大气视宁度的重要参数。运用差分像运动法，通过测量星像相对位置的变化计算 r_0 值，能够有效地消除非大气因素对大气视宁度测量的影响，使得测量结果更加准确可靠。差分像运动视宁度监测仪是以此原理设计研制的。

现如今，在量化天文视宁度领域，最普遍的方法是差分像运动测量法（Differential Image Motion Monitor, DIMM），由 Sarazin 和 Roddier 两位科学家在 1990 年为欧洲南方天文台选址时提出[1]。它由一个 35cm 口径的望远镜和一块有两个子瞳的掩模组成，最后连接一块 CCD。对于经过地球大气的单一目标光源，差分像运动视宁度监测仪测量其在望远镜入瞳面的两个子瞳上的波前到达角的相对方差，求得大气视宁度参数 r_0。该方法的优点是能有效消除望远镜由于风力载荷造成的追踪星轨误差、仪器抖动等非大气因素的影响，具有足够的时空精度，便于野外选址使用。1980 年以后，很多优良台址和新的选址工作都使用了差分像运动视宁度监测仪，例如：西班牙 La Palma 天文台选址[2]，日本 Subaru 八米望远镜选址[3]，国内有云南天文台丽江高美古 2.4 米望远镜选址[4]等。然而，差分像运动视宁度监测仪在测量过程中入瞳掩模的尺寸是固定的，所以一次曝光捕捉的图像上只能得到一组固定子瞳间距的星像相对位移信息。

DIMM 方法只能够测量总的大气视宁度，无法对某一层高度的大气视宁度进行测量，而三维大气视宁度测量是设计多层共轭自适应光学系统的前提，针对该问题文[5]于 2015

.基金项目:

收稿日期:2018-03-15；修订日期:2018-04-08

作者简介：王子跃，男，硕士.研究方向：差分像运动大气视宁度测量及评估. Email:wangziyuebit@163.com

任德清，男，教授.研究方向：天文仪器. Email:ren.deqing@csun.edu

年提出了多子孔径日间视宁度监测仪（Multiple-Aperture Seeing Profiler, MASP）[5]，用来测量日间大气视宁度。它由两个口径 40cm 的望远镜组成，选取双星作为导星，在 0-30km 范围分多层对大气湍流进行分析，进而得出大气视宁度参数 r_0 。它可以将大气湍流测量高度提升至 30km，等同于 112cm 大口径望远镜所能测量的高度。多子孔径日间视宁度监测仪具有成本低、可移动性强等优点，尤其适合还不具备大口径望远镜的新台址。但是一般情况下，只需测量总的大气相干长度 r_0 ，无需对多层大气湍流进行量化，另外多子孔径日间视宁度监测仪用到两台望远镜使得架设过程较为复杂，不便于总体大气视宁度的测量工作。

本文提出一种名为差分像运动视宁度优化监测法：I-DIMM（Improved to Differential Image Motion Monitor）。该方法在差分像运动视宁度监测仪[1]的基础上进行改良，不再采用瞳孔掩模制造子瞳的方式，而是改为在望远镜瞳面上选择两个间距 20cm 的子孔径，通过应用 MASP 中计算大气视宁度参数 r_0 的方法，对两个子孔径采集到的星像像差法处理，使得计算得到的 r_0 值更为精确。此外，相较于 DIMM 法，I-DIMM 系统通过改变两个子孔径之间的距离，得到不同子孔径间距情况下的 r_0 结果，尤其在较小子孔径间距（1.6 □ 3.0 个子孔径直径距离）时，I-DIMM 计算得到的 r_0 值比 DIMM 法更精确。

1 I-DIMM 系统描述

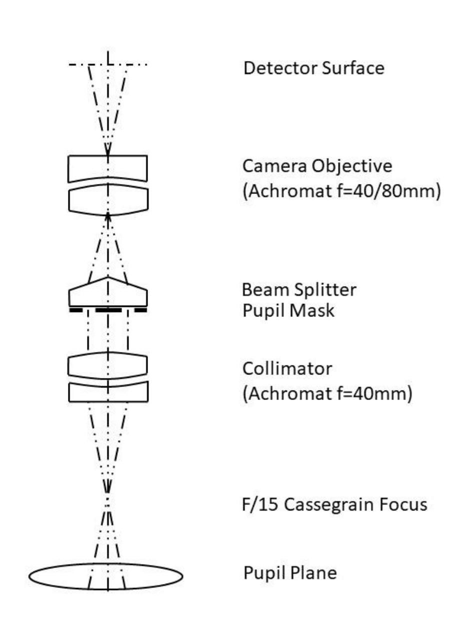


图 1 差分像运动视宁度监测仪光学系统示意图
Fig. 1 DIMM Optical Scheme

应用于欧洲南方天文台选址的差分像运动视宁度监测仪光学结构[1]如图 1，传统 DIMM 系统通常在小口径(比如 180mm~350mm)望远镜的入瞳上放置一块有两个子瞳(50mm~100mm)的掩模，并在其中一个子瞳上放置光楔，使到达这个子瞳的波前产生倾斜，从而同一目标星经过两子瞳后产生不重叠的双像，最后用探测器记录下一系列双像的瞬时状态，并统计双像相对位置的方差，即可计算出视宁度。本文用于对比的传统 DIMM 系统即

为此结构及原理。具体参数见表 1。

表 1 欧洲南方天文台 DIMM 参数

Table 1 ESO DIMM Parameters

ESO DIMM 技术参数名称	参数数值或型号
望远镜口径	35cm
子瞳口径 D	4cm
间距 d	20cm
d/D	5
焦比	f/15
探测器	增强 CCD
像元角尺寸	0.87′′x0.87′′

本文的 I-DIMM 系统在模拟时采用微透镜阵列将望远镜瞳面分割成多个子孔径，如图 2。将有效的哈特曼子孔径的线性阵列进行编号，如图 3。

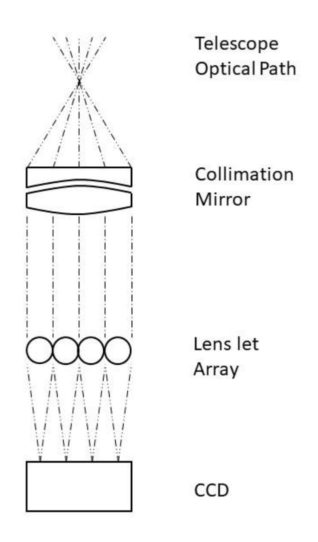


图 2 I-DIMM 工作流程图

Fig. 2 I-DIMM workflow diagram

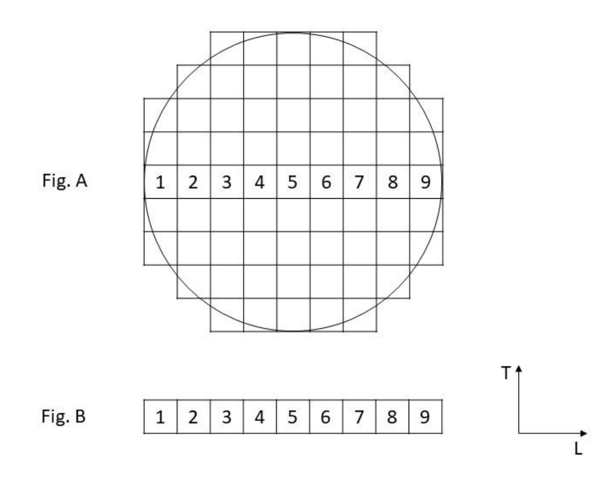


图 3　I-DIMM 夏克-哈特曼波前传感微透镜阵列

Fig.3　I-DIMM SHWFS lens let array

如图 3 的 I-DIMM 系统中，在直径长度上由 9 个哈特曼子孔径组成，相当于将望远镜瞳面直径方向上等分为 9 个子孔径（如图数字 1-9），每个子孔径的直径 4cm，与 DIMM 中子瞳口径相等（参见表 1，欧洲南方天文台 DIMM 参数表）。在同一行的哈特曼子孔径阵列中，相邻两个数字代表的孔径相距为一个子孔径直径的距离，即 1D。以此类推，数字间相差为 2 的两个子孔径间距为 2D，当数字间相差为 5 时，两个子孔径间距 5D，相当于 DIMM 中两个子瞳相距 20cm。这样在结构模型上完成了 I-DIMM 系统与 DIMM 系统的一致与统一。对于一个固定的子孔径间距，每一行阵列可以至少提供一种子孔径的组合方式。以 Fig. B 为例，子孔径 1 与 2 的组合间距为 1D，而子孔径 3 与 4 的组合间距也为 1D,以此类推，间距为 1D 可以找到 8 种子孔径组合。图 4 展示了直径不同的夏克-哈特曼子孔径组合的数量与对应的孔径间距之间的关系。

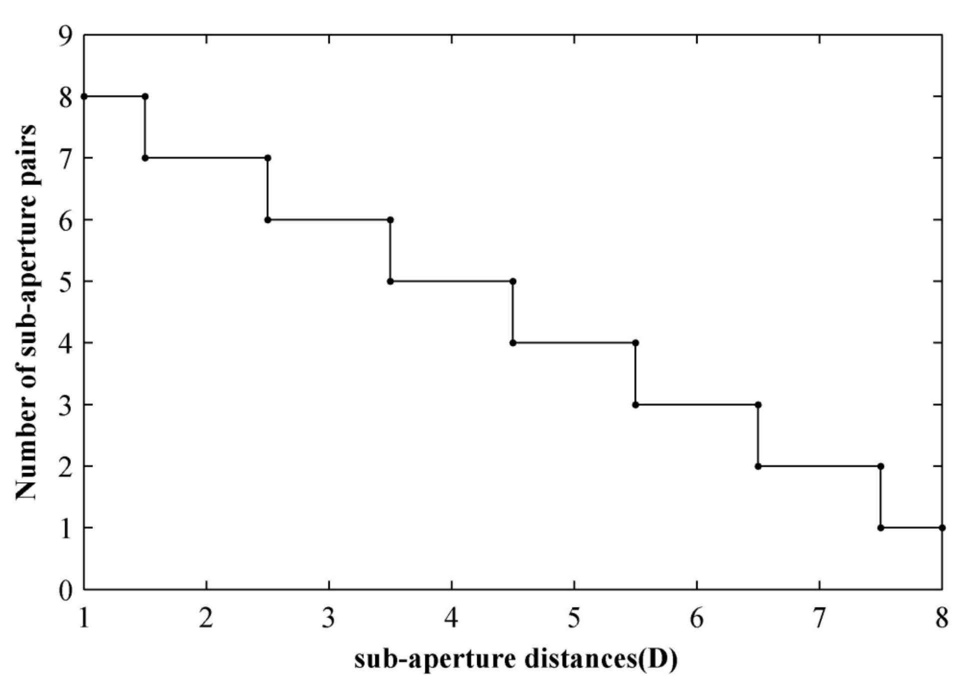


图 4　夏克-哈特曼子孔径组合数量与孔径间距的关系

Fig. 4　Number of sub-aperture pairs versus the sub-aperture distance

2 I-DIMM 计算理论

在传统的 DIMM 法[1]中，在 L 方向（沿着子瞳中心连线方向）差分像位移方差的表达式为

$$<[l(d)-l(0)]^2>=0.358\lambda^2 r_0^{-\frac{5}{3}} D^{-\frac{1}{3}}\cdot[1-0.541(\frac{d}{D})^{-\frac{1}{3}}]\ . \tag{1}$$

T 方向（垂直于子瞳中心连线方向）差分像位移方差的表达式为

$$<[t(d)-t(0)]^2>=0.358\lambda^2 r_0^{-\frac{5}{3}} D^{-\frac{1}{3}}\cdot[1-0.811(\frac{d}{D})^{-\frac{1}{3}}]. \tag{2}$$

两者方差可以用单个孔径的二维运动总方差 σ^2 表示：

$$\sigma^2=0.358(\frac{\lambda}{r_0})^{\frac{5}{3}}(\frac{\lambda}{D})^{\frac{1}{3}}\ . \tag{3}$$

理论上，假设 $S=d/D$ ，应用(3)式应满足条件：$S\geq 2$ 。式(4)(5)简化为：

$$\sigma_l^2=I_{DIMM}(S,0)\sigma^2 \tag{6}$$

$$\sigma_t^2=I_{DIMM}(S,\frac{\pi}{2})\sigma^2 \tag{7}$$

其中

$$I_{DIMM}(S,0)=1-0.541S^{-\frac{1}{3}} \tag{8}$$

$$I_{DIMM}(S,\frac{\pi}{2})=1-0.811S^{-\frac{1}{3}} \tag{9}$$

虽然，文[1]给出的上述近似表达已经对文[6]的表达式进行了改进，在 $d>D/2$ 时能够

和文[6]给出的近似值良好匹配[1]，例如，当$S = 1$时，沿着子瞳中心连线方向的差分像运动位移方差近似值偏差率为-0.2%，但是在垂直于子瞳中心连线的方向上，差分像运动位移方差却偏差了-17.3%。当*S*=2时，垂直于子瞳中心连线方向的差分像运动位移方差依然偏差较大，有-9.0%之多。所以，为得到更精确的r_0估计，本文将S趋近于0的情况也考虑其中，引用文[5]在MASP中的近似表达式：

$$\sigma_l^2 = \sum_{n=1}^{N} F_l(d,\theta,h_n)\sigma^2 , \tag{10}$$

$$\sigma_t^2 = \sum_{n=1}^{N} F_t(d,\theta,h_n)\sigma^2 . \tag{11}$$

其中：

$$F_l(d,\theta,h_n) = I_{I-DIMM}(\frac{\theta h_n - d}{D},0)/2 + I_{I-DIMM}(\frac{\theta h_n + d}{D},0)/2 - I_{I-DIMM}(\frac{\theta h_n}{D},0) , \tag{12}$$

$$F_t(d,\theta,h_n) = I_{I-DIMM}(\frac{\theta h_n - d}{D},\frac{\pi}{2})/2 + I_{I-DIMM}(\frac{\theta h_n + d}{D},\frac{\pi}{2})/2 - I_{I-DIMM}(\frac{\theta h_n}{D},\frac{\pi}{2}) . \tag{13}$$

由于本文研究导星数量为一，且仅评估总的r_0值，故$\theta = 0$，h_n是望远镜垂直上空大气湍流的叠加。再联合$S = d/D$，式(14)(15)改写为：

$$F_l(d,0,h_n) = I_{I-DIMM}(-S,0)/2 + I_{I-DIMM}(S,0)/2 - I_{I-DIMM}(0,0) , \tag{16}$$

$$F_t(d,\frac{\pi}{2},h_n) = I_{I-DIMM}(-S,\frac{\pi}{2})/2 + I_{I-DIMM}(S,\frac{\pi}{2})/2 - I_{I-DIMM}(0,\frac{\pi}{2}) . \tag{17}$$

对于方形子孔径，文[7]指出，函数$I_{I-DIMM}(i,0)$和函数$I_{I-DIMM}(i,\frac{\pi}{2})$的定义分别为

$$I_{I-DIMM}(i,0) = 2 - \left|1 - i\right|^{5/3} + 2\left|i\right|^{5/3} - \left|1 + i\right|^{5/3} , \tag{18}$$

$$I_{I-DIMM}(i,\frac{\pi}{2}) = 2 + 2\left|i\right|^{5/3} - 2(1 + i^2)^{5/6} . \tag{19}$$

引入函数$\mathrm{Comp}(I_{I-DIMM}/I_{DIMM})$：当$I_{I-DIMM}/I_{DIMM} < 1$时，函数值为0，即$I_{I-DIMM} < I_{DIMM}$，否则为1，即$I_{I-DIMM} > I_{DIMM}$。表2和表3给出了在两个方向上，Fried近似值、I_{DIMM}和I_{I-DIMM} 3种r_0计算方法在不同孔径分离比下的二维运动关系偏差值。

表2　L方向3种方法在不同孔径分离比下的二维运动关系偏差

Table　2 Difference of two-dimensional motion for various aperture-to-separation ratios in longitude by three methods

S	Fried	$I_{DIMM}(S,0)$	%偏差	$I_{I-DIMM}(S,0)$	%偏差	Comp()

1.0	0.460	0.459	-0.2	0.413	-10.0	0
1.5	0.545	0.527	-3.2	0.506	-4.0	0
2.0	0.593	0.571	-3.8	0.555	-2.8	0
2.5	0.625	0.601	-3.8	0.588	-2.2	0
3.0	0.648	0.625	-3.6	0.613	-1.9	0
3.5	0.665	0.644	-3.2	0.632	-1.9	0
4.0	0.678	0.659	-2.8	0.649	-1.5	0
4.5	0.688	0.672	-2.3	0.663	-1.3	0
5.0	0.696	0.684	-1.8	0.675	-1.3	0
5.5	0.703	0.694	-1.3	0.685	-1.3	0
6.0	0.708	0.702	-0.8	0.694	-1.1	0
6.5	0.712	0.710	-0.3	0.702	-1.1	0
7.0	0.717	0.717	0.0	0.709	-1.1	0
7.5	0.721	0.724	0.4	0.716	-1.1	0
8.0	0.720	0.730	1.3	0.722	-1.1	0
8.5	0.720	0.735	2.1	0.728	-1.0	0
9.0	0.719	0.740	2.9	0.733	-0.9	0
9.5	0.718	0.745	3.7	0.738	-0.9	0
10.0	0.717	0.749	4.5	0.742	-0.9	0

表 3　T 方向 3 种方法在不同孔径分离比下的二维运动关系偏差

Table 3　Differences of two-dimensional motion for various aperture-to-separation ratios in transverse by three methods

S	Fried	$I_{DIMM}(S,\pi/2)$	%偏差	$I_{I-DIMM}(S,\pi/2)$	%偏差	Comp()
1.0	0.228	0.189	-17.3	0.218	15.3	1
1.5	0.320	0.291	-9.0	0.295	1.4	1
2.0	0.382	0.356	-6.8	0.351	-1.4	0
2.5	0.425	0.402	-5.4	0.394	-2.0	0
3.0	0.458	0.437	-4.5	0.427	-2.3	0
3.5	0.484	0.466	-3.8	0.455	-2.3	0
4.0	0.504	0.489	-3.0	0.478	-2.2	0
4.5	0.521	0.509	-2.4	0.497	-2.4	0
5.0	0.535	0.525	-1.8	0.514	-2.1	0
5.5	0.546	0.540	-1.0	0.529	-2.0	0
6.0	0.555	0.553	-0.3	0.542	-2.0	0
6.5	0.564	0.565	0.2	0.554	-2.0	0
7.0	0.573	0.576	0.5	0.565	-2.0	0
7.5	0.579	0.585	1.1	0.575	-1.7	0
8.0	0.582	0.594	2.1	0.584	-1.7	0
8.5	0.585	0.602	3.0	0.592	-1.7	0

9.0	0.586	0.610	4.1	0.600	-1.6	0
9.5	0.588	0.617	4.9	0.607	-1.6	0
10.0	0.588	0.623	6.0	0.614	-1.4	0

其中，I_{DIMM} 的偏差值是与 Fried 给出的近似值比较的结果，I_{I-DIMM} 的偏差值是与I_{DIMM} 值比较的结果。

图 5 和图 6 给出了两个方向上 3 种方法在不同孔径分离比的二维运动关系曲线。

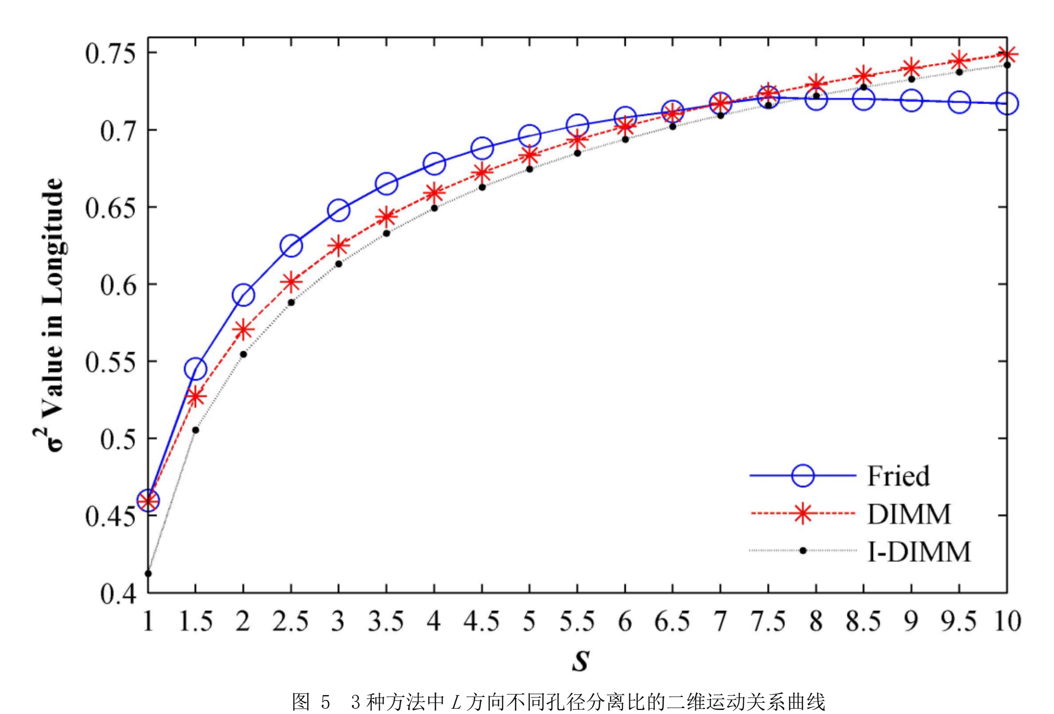


图 5 3 种方法中 *L* 方向不同孔径分离比的二维运动关系曲线

Fig.5 Graphs of two-dimensional motion for various aperture-to-separation ratios in longitude by three methods

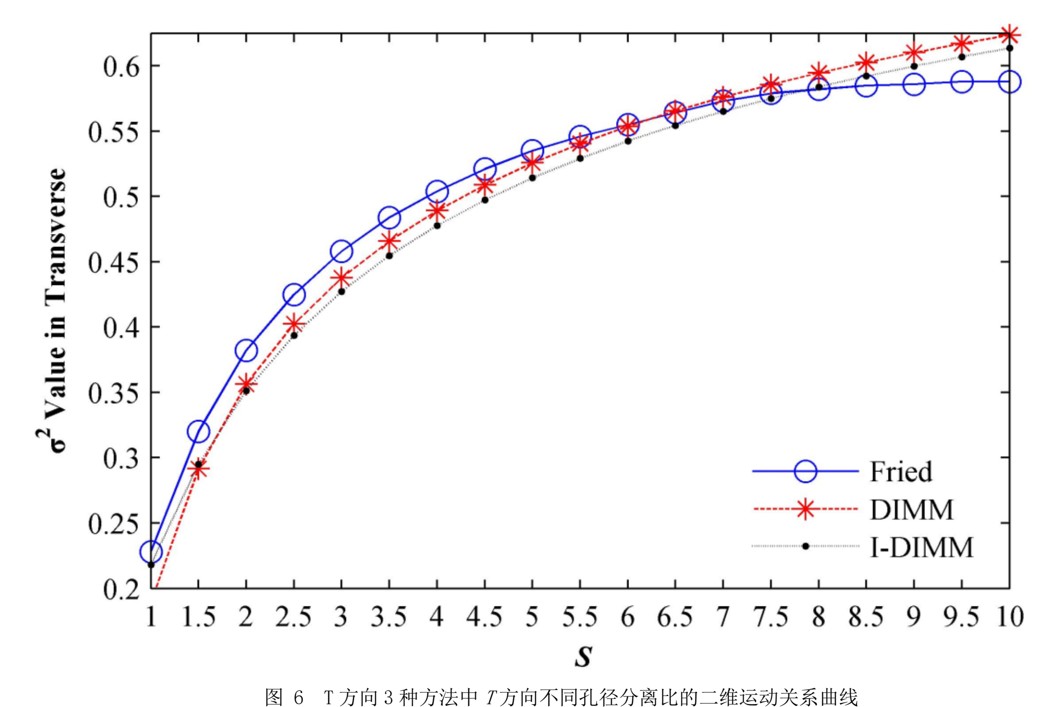


图 6　T 方向 3 种方法中 T 方向不同孔径分离比的二维运动关系曲线

Fig. 6 Graphs of two-dimensional motion for various aperture-to-separation ratios in transverse by three methods

图5和图6直观地显示，改进后的 I_{I-DIMM} 在L方向上均小于 I_{DIMM} 。T方向上，当 $S<1.6$ 时，I_{I-DIMM} 略大于 I_{DIMM}，当 $S\geq1.6$ 时，I_{I-DIMM} 均小于 I_{DIMM} 。尽管 I_{DIMM} 是 Roddier[1] 针对欧洲南方天文台 DIMM 圆形子孔径的简化公式，而 I_{I-DIMM} 是针对线性类方孔径的简化公式，但根据表 2 和表 3 的量化比较，在 $S\geq1.5$ 时，两种简化表达式相差仅仅在 2%上下，孔径形状的不同不会对计算结果带来明显的误差。

3 I-DIMM 与 DIMM 对比模拟

3.1 子孔径间距 20cm 时 I-DIMM 与 DIMM 对比模拟

本文使用专业光学软件 YAO（YAO 是被广泛公认的用以模拟不同大气及星源条件下点扩散函数成像的软件）。在 Linux 环境下运行 YAO，设置望远镜口径为 36cm，直径方向上设置 9 个子孔径，每个子孔径直径 4cm，设置与传统 DIMM 相同的望远镜参数[1]，这样，I-DIMM 在硬件上与 DIMM 完全相同，所以排除了两种方法在计算 r_0 值时因为硬件原因导致的差异与误差，最终结果的差异完全因为计算公式的差异。在硬件上通过设置大气湍流参数，初始化 r_0 设置值 0.1m（$std=0.1$），运行仿真软件得到一系列光源的点扩散函数模拟图像，仿真 DIMM 中差分像运动图像的曝光捕捉。具体设置参数如表 4。

表 4　YAO 参数设置

Tab. 4 Software YAO setup parameters

YAO 参数设置

望远镜口径	0.36m
子孔径口径 *D*	0.04m
间距 *d*	0.04-0.32m
S=d/D	1-8
子孔径像元角尺寸	0.87″× 0.87″
工作波长	500nm
曝光时间	10ms
点扩散函数图像	2000 幅/组数
模拟组数	100
初始设置总 r_0 值	0.1m

每次模拟处理 2000 幅点扩散函数图像，共模拟 100 次。利用图像质心算法求得每一个子孔径上图像质心在 *L*（沿着子瞳中心连线）和 *T*（垂直于子瞳中心连线）方向的坐标，结合差分像运动算法，求得在两个方向上的大气视宁度参数 r_0 值，图 7 和图 8 分别给出了 *L* 和 *T* 两个方向上，$S = 5$ 时，100 次模拟求得的 r_0 值。

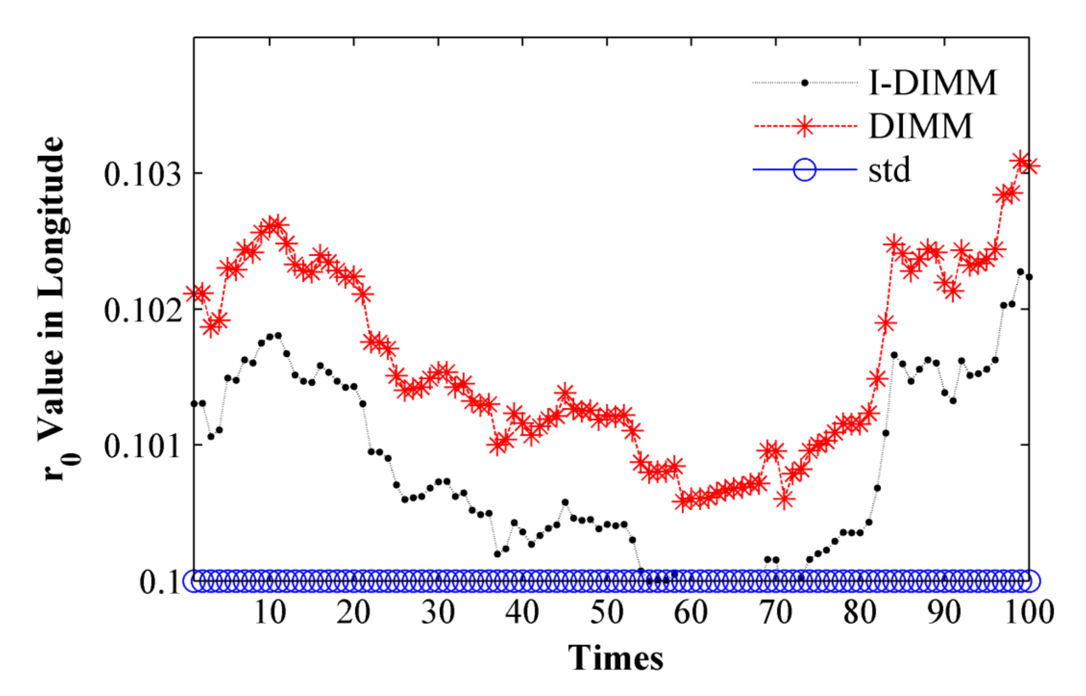


图 7 $S = 5$ 时 *L* 方向 100 次模拟 r_0 计算值

Fig. 7 $S = 5$ results of r_0 by 100 times simulating in Longitude

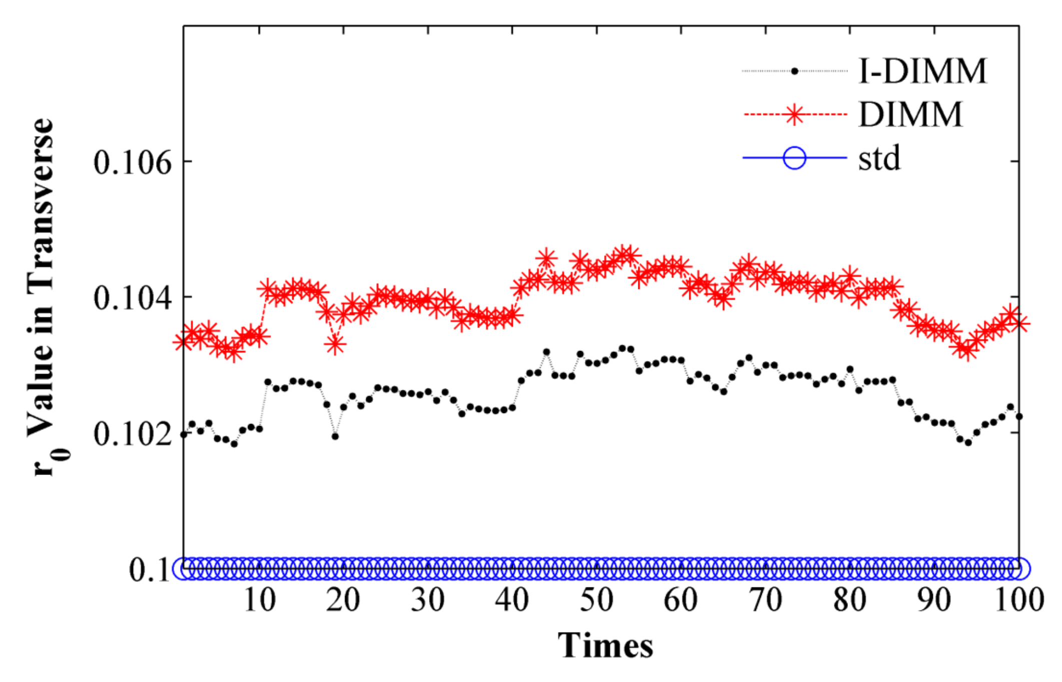


图 8 $S=5$ 时 T 方向 100 次模拟 r_0 计算值

Fig. 8 $S=5$ results of r_0 by 100 times simulating in Tranverse

如图 7 和图 8，当子孔径间距 20cm，即孔径分离比 $S=5$ 时，100 次模拟中 I-DIMM 测量 r_0 值均比 DIMM 更接近设置值 0.1m。 L 方向上，I-DIMM 测量 r_0 平均值为 0.1008m，误差 0.8%，小于 DIMM 的误差 1.6%；T 方向上，I-DIMM 测量 r_0 为 0.1026m，误差 2.6%，小于 DIMM 的误差 4.0%。图 9 给出了 100 次模拟总 r_0 计算值。

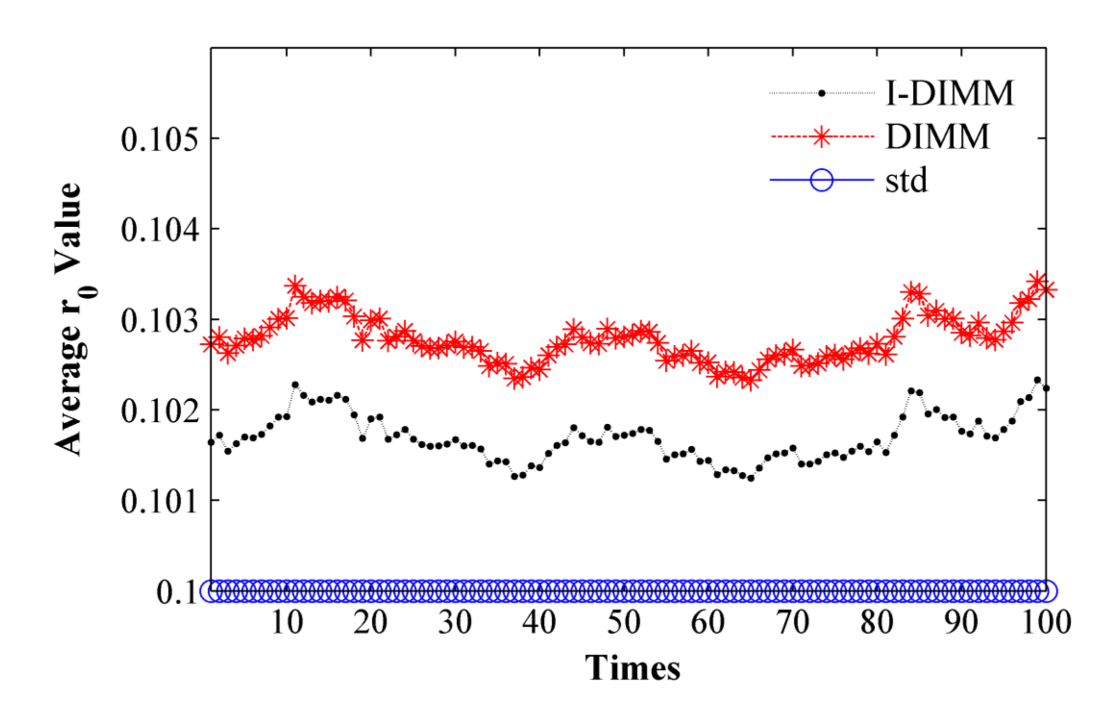


图 9 $S = 5$ 时 100 次模拟总 r_0 计算值

Fig. 9 $S = 5$ results of total r_0 by 100 times simulating

I-DIMM 测量总的 r_0 平均值为 0.1017m，误差 1.7%，小于 DIMM 的误差 2.8%。所以证明了 I-DIMM 得到的 r_0 值比传统 DIMM 法得到的更加精确。

3.2 方形子孔径误差模拟

本文 3.1 节证明了改用 I-DIMM 计算公式，可以提高 r_0 计算值的计算精度，但是，传统 DIMM 采用的公式是在 1990 年提出的，由于当时计算能力有限，再加上主要应用于圆形子孔径，与本文模拟时的方形孔径有差别，必然导致一定的计算偏差。尽管在第 3 部分论证了与 I-DIMM 公式误差仅仅在 2%左右，完全可以忽略。但是，为了排除 Sarazin 和 Roddier 为欧洲南方天文台 DIMM 中提出的针对圆形子孔径计算公式带来的误差，进一步验证运用 I-DIMM 对计算精度的影响，对两种方法中的 r_0 计算均采用 I-DIMM 的计算公式，不同的是，模拟孔径间距为 20cm 的传统 DIMM 计算时只处理孔径 1 和 6 的像差分信息，而在模拟 I-DIMM 时，如图 4，I-DIMM 系统的微透镜阵列在直径方向上最多可以提供 4 组孔径间距为 20cm 的像差分信息，所以为计算 r_0 值提供了更多组数。以一次模拟 2000 幅点扩散函数图像计算 r_0 为例，I-DIMM 相当于处理 8000 幅点扩散函数图像，是 DIMM 处理像差分信息量的 4 倍。图 13 给出了对 20 次模拟，每次模拟 2000 幅图像得到总 r_0 平均值的结果：

表 5 总 r_0 平均值

Table 5 The average results of total r_0

方法	I-DIMM	DIMM
点扩散函数图像数/次	2000	2000
模拟次数	20	20
计算总 r_0 平均值	0.1017	0.1019

如表 5，I-DIMM 计算总 r_0 平均值为 0.1017，误差为 1.7%，比只处理一组信息的 DIMM 法计算误差 1.9%更加精确，所以，在处理相同数量图像时，I-DIMM 计算更多的子孔径像偏移信息，计算值也比 DIMM 更精确。

3.3 子孔径间距比 $S \le 3$ 时 I-DIMM 与 DIMM 对比模拟

根据文[1]的理论，使用 DIMM 时要求 $S \ge 2$ ，而实际的望远镜未必一定满足这一条件，比如，美国的 NOAO 和欧洲南方天文台的选址[3]，也刚刚达到 $S = 2$ ，再比如，台湾的选址[3]，$S = 1.6$ 。实际上，当 S 越小（$S \le 3$），望远镜口径也能随之越小，更便于选址作业。为了评估 S 较小情况下 I-DIMM 测量 r_0 值的精确程度，本文详细分析了 S 较小（$S \le 3$）时的情况。图 10 与图 11 分别给出了 S 较小时 100 次模拟 r_0 计算平均值。

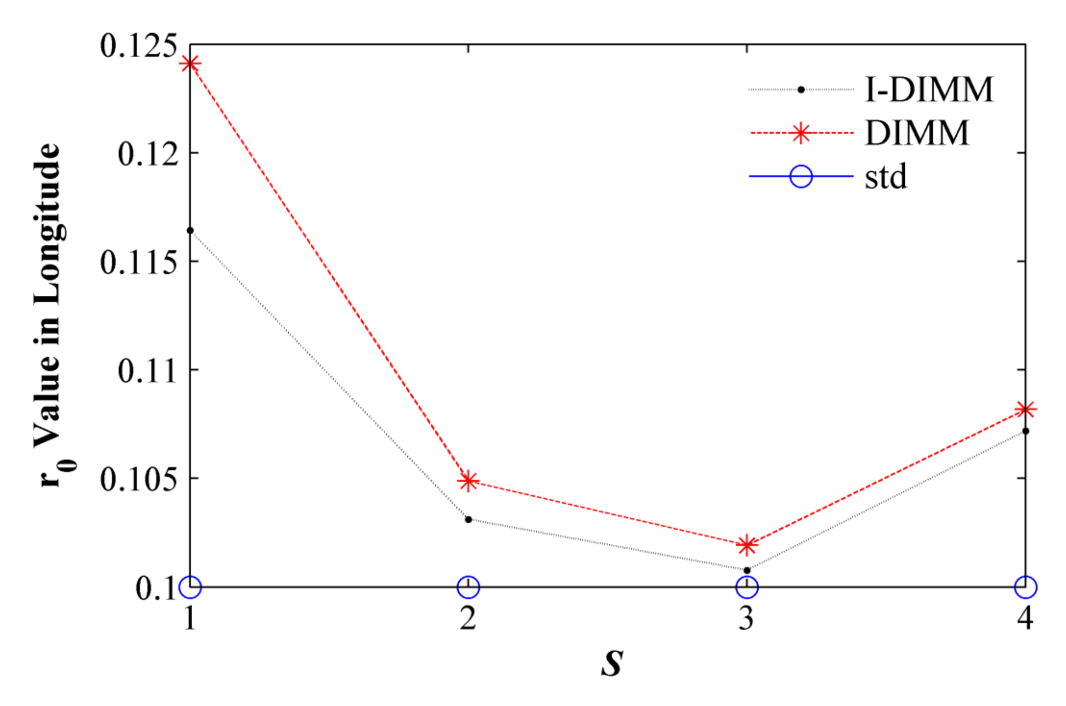


图 10 0.36m 望远镜 L 方向 r_0 计算结果

Fig. 10 Results of r_0 in longitude via 0.36m telescope

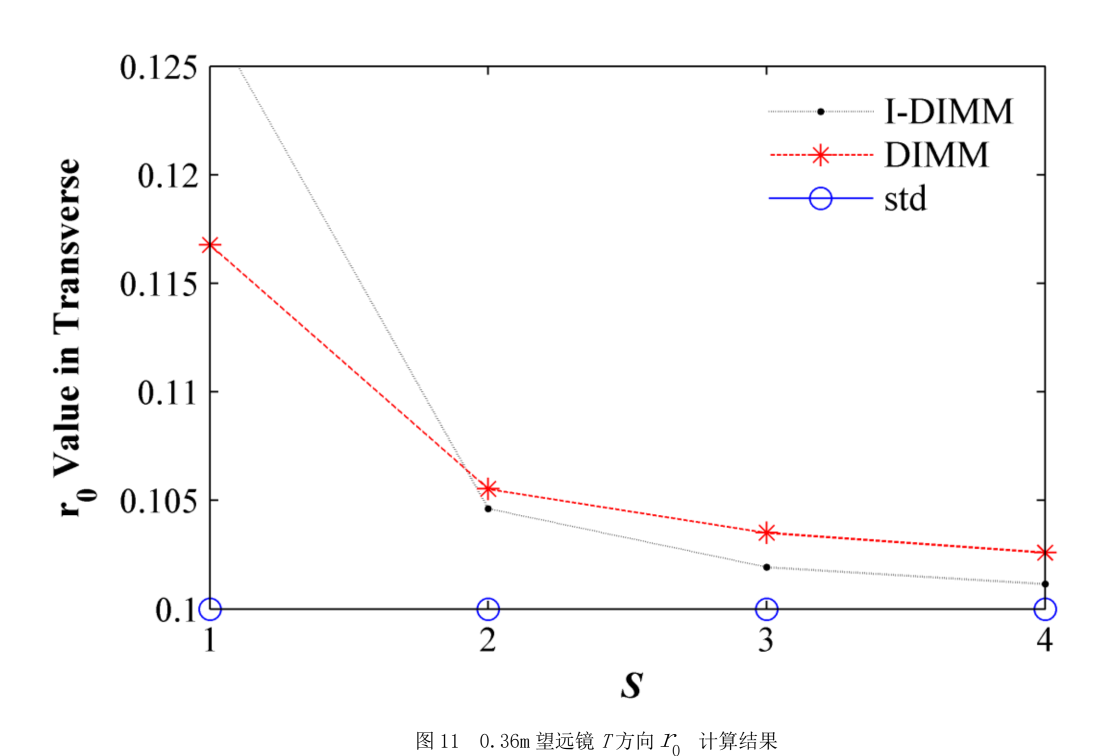


图 11 0.36m 望远镜 T 方向 r_0 计算结果

Fig. 11 Results of r_0 in transverse via 0.36m telescope

如图 10，在 L 方向上，I-DIMM 法求得的 r_0 值均小于 DIMM 法所求值，且距离 r_0 设置值的基准线更近，说明 I-DIMM 法求得的 r_0 值更精确。实际数值上，当 $S = 1, 2, 3$ 时，

[在此处键入]

I-DIMM 计算 r_0 值分别为 0.1164m，0.1031m 和 0.1007m，误差分别为 16.4%，3.1% 和 0.7%，均小于 DIMM 计算 r_0 值误差 24.1%，4.9% 和 1.9%。在 T 方向上，当 $S=2,3$ 时，I-DIMM 法计算 r_0 值为 0.1046m 和 0.1019m，误差 4.6%和 1.9%，均小于 DIMM 法误差值 5.6%和 3.5%，且 I-DIMM 曲线距离 r_0 设置值的基准线更近，证明了 I-DIMM 法计算 r_0 值在 T 方向同样更为精确。由于 r_0 与 $I_{(I-DIMM,DIMM)}$ 的单调性一致，当 I_{I-DIMM} 大于 I_{DIMM} 时，I-DIMM 的 r_0 计算值也大于 DIMM，如图 6，当 $S<1.6$ 时，$I_{I-DIMM}>I_{DIMM}$，所以当 $S=1$ 时，I-DIMM 法计算值大于 DIMM 法所求的 r_0 值，偏离基准线也更远。图 12 给出的 100 次模拟总 r_0 值的平均值，同样印证了上述结论。

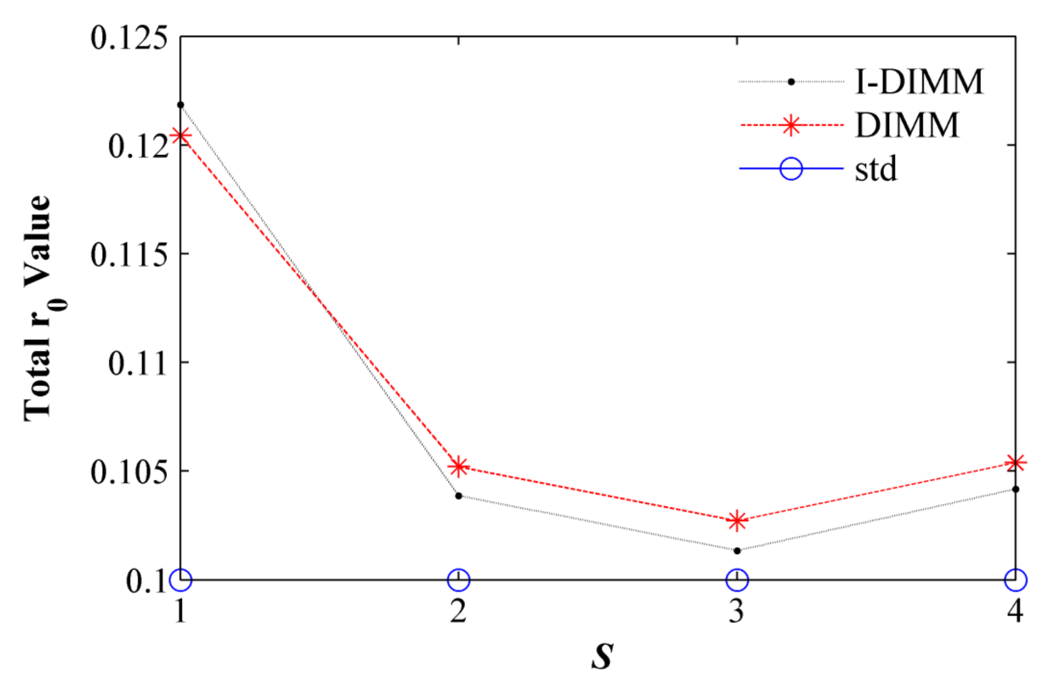


图 12 0.36m 望远镜总 r_0 计算结果

Fig. 12 Results of Total r_0 via 0.36m telescope

4 0.12m 口径望远镜 I-DIMM 的模拟

在软件 YAO 上，设置望远镜口径为 12cm，子孔径直径 4cm，子孔径间距 8cm，即 $S=2$，初始 r_0 设置值 0.03m（$std=0.03$），具体参数如表 6。

表 6 YAO 参数设置

Table 6 Software YAO setup parameters

YAO 参数设置	
望远镜口径	0.12m
子孔径口径 *D*	

[在此处键入]

间距 d	0.04m
$S=d/D$	0.08m
子孔径像元角尺寸	2
工作波长	1.3″× 1.3″
曝光时间	500nm
点扩散函数图像	10ms
初始设置总 r_0 值	2000 幅
	0.03m

运用差分像运动法结合式(20)(21)，图 13 给出了 L 和 T 两个方向上 20 次模拟求得的 r_0 计算平均值.

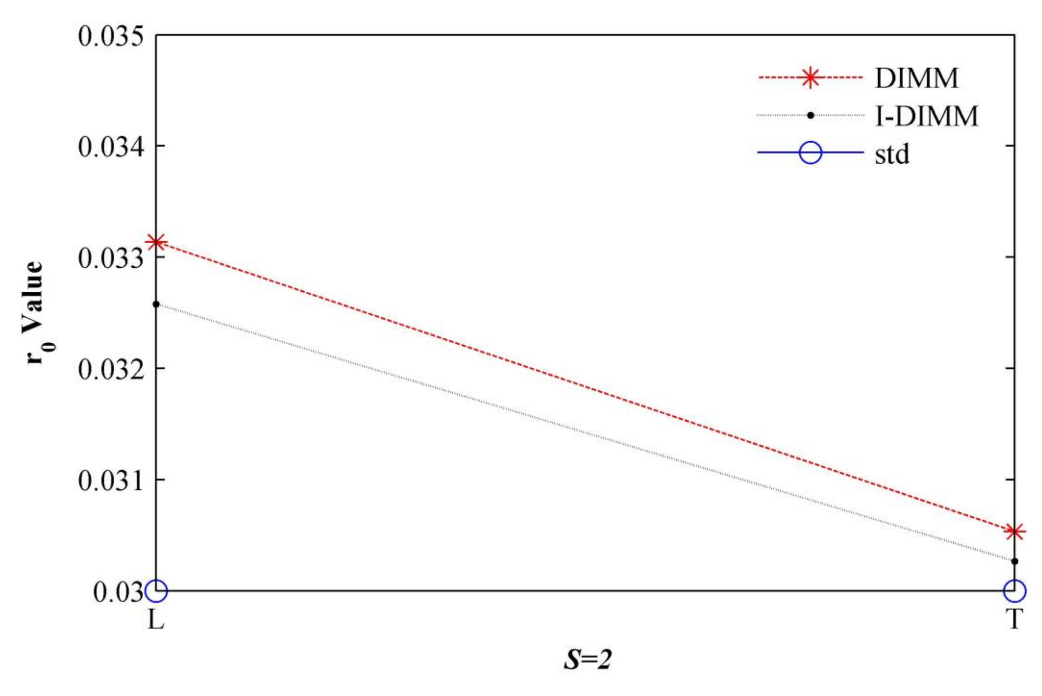


图 13　0. 12m 望远镜 r_0 计算结果

Fig. 13 Results of r_0 via 0.12m telescope

如图 13，当 $S = 2$ 时，无论在 L 方向或是 T 方向，本文所用 I-DIMM 法求得 r_0 值都更接近 r_0 设置值 0. 03m 的基准线，说明计算结果更精确。计算值分别为 0. 0326m 和 0. 0303m，与设置值的误差为 8. 6%和 0. 9%，低于 DIMM 法所得计算值误差 10. 5%和 1. 8%。I-DIMM 计算得总的 r_0 值为 0. 0314m，误差 4. 7%，小于 DIMM 的误差值 6. 1%。这表明小口径望远镜，子孔径间距分离比 S 尽管很小，但 I-DIMM 法求得的总 r_0 值比 DIMM 更精确。

5 结 语

[在此处键入]

本文介绍了差分像运动视宁度优化监测法（I-DIMM），在小口径望远镜上，选取一定间距的两个子孔径组合即可计算得到大气视宁度参数 r_0 值。本文通过和传统 DIMM 对比，在计算公式方面，不但证明了 I-DIMM 法应用的计算公式在孔径间距为 20cm 时计算 r_0 值比 DIMM 的公式更精确，而且还证明了在孔径间距很小的情况下 I-DIMM 得到的 r_0 值同样比 DIMM 更精确，尤其当孔径分离比在1.6 ～ 3 之间时，无论在沿子孔径中心连线方向还是垂直于子孔径中心连线方向，I-DIMM 法计算得到的 r_0 值都比 DIMM 精确，最大误差在 5%左右。在子孔径组合方面，当星像图像数量相同，孔径间距固定时，I-DIMM 处理一张图像子孔径信息的组合数大于或等于 1，大多数情况下比 DIMM 处理一张图像只能得到一组子孔径星像偏移信息要多，从而进一步提高了 r_0 计算精度。

本文又通过模拟 0.12m 口径望远镜，在孔径分离比为 2 的视宁度测量情况，进一步验证了 I-DIMM 法计算 r_0 值比 DIMM 更精确。这就为使用更小口径望远镜提供了证据。同时，I-DIMM，只需小口径望远镜上的部分孔径组合，即可求得精确的大气视宁度参数 r_0，极大地简化了仪器设备，更利于开放环境下便携的大气视宁度测量和选址作业。

参考文献

[1] SARAZIN M, RODDIER F. The Eso Differential Image Motion Monitor [J]. Astron Astrophys, 1990, 227(1): 294-300.

[2] VERNIN J, MUNOZTUNON C. Optical Seeing at La-Palma-Observatory .1. General-Guidelines and Preliminary-Results at the Nordic Optical Telescope [J]. Astron Astrophys, 1992, 257(2): 811-6.

[3] 谭徽松，岑学奋，钱铜铃. 用 DIMM 测视宁度的几个问题 [J]. 云南天文台台刊，2002，01): 38-46.

[4] 岑学奋，钱铜铃，王建成, et al. 高美古的大气视宁度 [J]. 云南天文台台刊, 2002, 04): 45-50.

[5] REN D Q, ZHAO G, ZHANG X, et al. Multiple-Aperture-Based Solar Seeing Profiler [J]. Publ Astron Soc Pac, 2015, 127(955): 870-9.

[6] FRIED D L. Differential Angle of Arrival - Theory, Evaluation, and Measurement Feasibility [J]. Radio Sci, 1975, 10(1): 71-6.

[7] SCHARMER G B, VAN WERKHOVEN T I M. S-DIMM plus height characterization of day-time seeing using solar granulation [J]. Astron Astrophys, 2010, 513(

[8] TOKOVININ A, KORNILOV V. Accurate seeing measurements with MASS and DIMM [J]. Mon Not R Astron Soc, 2007, 381(3): 1179-89.

[9] TOKOVININ A. From differential image motion to seeing [J]. Publ Astron Soc Pac, 2002, 114(800): 1156-66.

[10] 岑学奋，许骏，钱铜铃. 云南天文台 DIMM 的视宁度测量和评估 [J]. 云南天文台台刊, 1996, S1): 73-80. Cen Xuefen, Xu Jun, Qian Tongling. Seeing Measurement and Evaluation with the DIMM at the Yunnan Observatory, [J]. Publications of The Yunnan Obsevatory, 1996, S1): 73-80.

[11] 辛玉新，范玉峰，伦宝利. 等. 长期视宁度监测 DIMM 系统设计方案 [J]. 天文研究与技术, 2012, 04): 397-404. Xin Yuxin, Fan Yufeng, Lun Baoli, et al. A Design of a DIMM System for Long-Term Seeing Measurement [J]. Astronomical Research & Technology, 2012, 04): 397-404.

[12] 陈华林，裴冲，袁祥岩，等. 差分图像运动监测仪的数值模拟与对比实验研究 [J]. 光子学报，2014，12): 62-7. Chen Hualin, Pei Chong, Yuan Xiangyan, et al. Research of Numerical Simulation and Comparison of Experiment from Differential Image Motion Monitor [J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 12): 62-7.

[13] 钱铜铃，许骏，岑学奋. 两套 DIMM 系统的比对观测及结果分析 [J]. 云南天文台台刊, 1996, 04): 62-8. Qian Tongling, Xujun, Cen Xuefen. The Comparison of Two Sets of Three Aperture DIMM and Its Result Analysis [J]. Publications of The Yunnan Obsevatory,

1996, 04): 62-8.
[14] WANG L Q, SCHOCK M, CHANAN G, et al. High accuracy DIMM measurements for the TMT site testing program - art. no. 62671S [J]. Ground-based and Airborne Telescopes, Pts 1 and 2, 2006, 6267(S2671-S.
[15] BECKERS J M. A seeing monitor for solar and other extended object observations [J]. Exp Astron, 2001, 12(1): 1-20.

Improved to Differential Image Motion Monitor

Wang Ziyue[1,3], Ren Deqing[2,3]
1 (Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042，China)
2 (Physics & Astronomy Department, California State University Northridge, Northridge, California 91330-8268, USA)

Abstract: The atmospheric seeing is an important index to measure the atmospheric optical quality of the site. The Differential Image Motion Monitor (DIMM) is widely used for site testing at home and abroad. For example, ESO DIMM was implied in site testing for Europe Southern Observatory. This paper introduced an excellent method of seeing measurement: Improved to Differential Image Motion Monitor (I-DIMM). Firstly, the structure design of I-DIMM and seeing calculation method were described in details. After that, followed by setting the two telescopes, of which one’s diameter is 0.36m and the other is 0.12m, this paper compared the calculated values of seeing in these two situations. Both results showed that calculating seeing by method I-DIMM was more accurate than DIMM. Finally, this paper analyzed both simulation results and introduced the advantages of I-DIMM compared to DIMM.

Keywords: I-DIMM; atmospheric seeing; site; DIMM